

А.В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, **Л.В. ГОНЧАРЕНКО**, канд. техн. наук,
Т.А. ЕСИПЕНКО, А.А. КОГТИН (г. Харьков)

КОНДЕНСАЦИОННАЯ СИСТЕМА УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПOTЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЛОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

Запропоновано варіант технічної системи «котел-теплоутилізатори», в основу розробки якої покладено принцип використання прихованої теплоти пароутворення відхідних газів котла в конденсаційних апаратах для нагрівання повітря і води. Гаряче повітря подається в пальниковий пристрій, вода використовується в системі гарячого водопостачання. Приведено теплотехнічні показники системи.

Variant of the technical system “boiler-recycling units” is developed. The principle using of the hiding heat of the steam formation of the gases leaving of the boiler in the condensation units for warming air and water was put in her base. The hot air are giving to the burning structure, the water are using in the system of the hot water supply. Heat and technical characteristics of this system are resulted.

В последние годы в Украине наблюдается увеличение доли децентрализованных систем теплоснабжения и горячего водоснабжения [1,2,4]. Это обусловлено тем, что, как указывается в [1], существенно возросла стоимость энергетических услуг, предоставляемых предприятиями централизованного теплоснабжения (цена 1 Гкал теплоты составляет 60-80 грн.), что, в свою очередь, связано с удорожанием дефицитных видов топлива, таких как природный газ и мазут. В этих условиях индивидуальное теплоснабжение является экономически более выгодным и поэтому привлекательным.

Как правило, автономные системы теплоснабжения и горячего водоснабжения внедряются на промышленных предприятиях относительно небольшой мощности: в агропромышленном комплексе, в пищевой промышленности, в торговых центрах, в больницах, в административных зданиях и офисах, в индивидуальных жилых постройках и т.п. Кроме того, для технологических целей часто требуются пар и вода различных параметров.

Для достижения вышеприведенных целей применяются водогрейные и паровые котлы небольшой производительности как отечественного, так и зарубежного производства, которые работают на природном газе и устанавливаются непосредственно в зоне их эксплуатации. Экономический эффект от внедрения децентрализованного теплоснабжения может быть достаточно весомым, так как нет необходимости в строительстве здания котельной; из-за отсутствия протяженных теплотрасс практически исключаются потери теплоты в окружающую среду; существенно уменьшаются капитальные затраты на оборудование и его монтаж; повышаются возможности ведения оптимальных режимов эксплуатации;

растет уровень безотказности и надежности. Например, как сообщается в [1], только из-за аварийного состояния трубопроводов и тепловой изоляции в системах централизованного теплоснабжения теряется около 30 % вырабатываемой теплоты. В соответствии с [4] себестоимость теплоты, вырабатываемой в автономной системе теплоснабжения, в 1,5-1,6 раза меньше по сравнению с централизованной.

В связи с повышенным интересом к автономным системам теплоснабжения в Украине, России, Белоруссии и в других странах СНГ появилось большое количество фирм, производящих водогрейные котлы мощностью 50-1200 кВт (в основном газотрувные), паровые котлы паропроизводительностью 1-5 т/ч, водонагреватели различной теплопроизводительности. Коэффициент полезного действия (КПД) таких котлов, рассчитанный по низшей теплоте сгорания топлива, не превышает 89-92 %. Следует отметить, что котельные агрегаты зарубежных фирм имеют примерно такой же КПД, но значительно дороже отечественных. В котлах, использующих в качестве топлива природный газ и мазут, температура уходящих продуктов сгорания топлива находится в пределах 160-250 °С. В соответствии с этим КПД котла определяется величиной потерь теплоты с уходящими газами, которая достигает 7-10 %. В Украине в настоящее время используются также устаревшие котельные установки типа «Универсал», НИИСТу-5 и т.п., КПД которых не превышает 60 % [1]. По данным, приведенным в [3], автономные генераторы теплоты покрывают порядка 17 % потребности России в паре и горячей воде. В [1] сообщается, что индивидуальные котлы и котельные предприятия Украины потребляют более 30 % топлива, расходуемого на теплоснабжение, горячее водоснабжение и технологические нужды.

В соответствии с вышеизложенным в условиях постоянного роста цен на топливо, отсутствия финансирования и инвестиций в развитие систем теплоснабжения, дороговизны котельных агрегатов зарубежного производства при переходе к рыночной экономике важным и актуальным звеном государственной стратегической политики становится энергосбережение, основным направлением которого является экономия топливно-энергетических ресурсов. Одним из путей решения задачи энергосбережения может стать, предлагаемая во многих публикациях, например, в [1,2,4-7], глубокая утилизация теплоты уходящих из котлов газов за счет их охлаждения до температур 30-40 °С (ниже точки росы), позволяющая на 10-15 % снизить расход топлива при относительно небольших капитальных затратах. Так, например, в [7] приводится, что замена небольших отопительных котлов традиционного типа в системе индивидуального теплоснабжения района г. Гамбурга (Германия) на конденсационные котлы позволила снизить стоимость отопления почти на 30 %, применение автономных конденсационных водонагревателей, по мнению авторов [1] дает возможность уменьшить стоимость

вырабатываемой теплоты в 2-3 раза по сравнению с централизованной системой теплоснабжения.

Реализация идеи глубокой утилизации теплоты уходящих газов осуществляется с помощью различных теплотехнологических схем, предусматривающих использование конденсационных котлов, контактных теплообменных аппаратов (ТА), ТА поверхностного типа, ТА с тепловыми трубами и термосифонами, ТА с промежуточными теплоносителями, водонагревателей конденсационного типа и др. При этом основными требованиями, предъявляемыми к ним, являются: простота конструкции, низкая материалоемкость, дешевизна материалов и теплоносителей, компактность в связи с отсутствием площадей в котельных для размещения дополнительного оборудования, высокое качество нагреваемой воды с точки зрения ее использования потребителями, небольшие капитальные и эксплуатационные затраты, небольшой срок окупаемости, надежность и долговечность (отсутствие коррозии материалов в условиях конденсации водяных паров из парогазовых смесей) и т.п.

Анализ существующих способов глубокой утилизации теплоты уходящих газов показал, что интересным вариантом с точки зрения соответствия этим требованиям является конденсационный экономайзер, предложенный А.П. Капишниковым [5]. В экономайзере осуществляется нагрев воды от 17-18 °С до 43-48 °С последовательно в конденсационной и конвективных ступенях, образованных оребренными пучками труб. Ступени разделены вертикальной перегородкой. Уходящие газы с температурой 250 °С охлаждаются в конвективной («сухой») ступени до 110 °С и, огибая перегородку, проходят через насадку из колец Рашига в конденсационную ступень, где охлаждаются до 32-42 °С. В насадке и конденсационной ступени происходят процессы испарения и конденсации, что обеспечивает достаточно высокие коэффициенты теплопередачи (в среднем порядка 140 Вт/м²К при скоростях движения газов, равных 3,7-4,9 м/с, и 25 Вт/м²К при вдвое меньших скоростях). К недостаткам конденсационного экономайзера, по нашему мнению, следует отнести низкие значения коэффициентов теплопередачи в конвективной (бесконденсационной) ступени, наличие процессов испарения, существенно снижающих эффект глубокой утилизации теплоты уходящих газов, высокая относительная влажность газов за экономайзером (около 95 %), низкий температурный уровень нагретой воды, усложняющей ее использование. Учитывая это, авторы [6] предложили теплоутилизационную систему, в состав которой входят: котел, конденсационный воздухоподогреватель (КВП) с шарообразным промежуточным теплоносителем и конденсационный теплообменный аппарат (КТА) для нагрева воды, используемой в системе горячего водоснабжения, теплообменник для повышения температуры нагретой в КТА воды до 65 °С путем ее смешения с горячей водой (или паром), нагреваемой в котле. Для нагрева воздуха, подаваемого в горелочные устройства и в газоотводящий тракт для его

защиты от коррозии, в КВП используется вся физическая теплота «сухих» уходящих газов (бесконденсационный режим теплообмена) и небольшая часть (порядка 7-10 %) их физической и латентной теплоты (конденсационный режим теплообмена). В связи с этим с целью обеспечения высокой компактности КВП и, соответственно, низкой его материалоемкости целесообразным является применение промежуточного шарообразного теплоносителя, обладающего высокой удельной поверхностью теплообмена (при $d_{ш} = 0,04 - 0,05$ м $a = 860 - 700$ м²/м³), недостижимой для других известных поверхностей нагрева, а также достаточно большими значениями коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи (α порядка 200-250 Вт/м²К; $\kappa = 50 - 80$ Вт/м²К). Нагрев воды осуществляется за счет низкопотенциальной теплоты, выделяющейся, в основном, при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в области низких температур (порядка 55-30 °С). В этих условиях наиболее приемлемым вариантом теплообменной поверхности являются оребренные трубные пучки с антикоррозионной защитой. Так как коэффициенты теплопередачи при конденсации водяных паров из продуктов сгорания могут достигать 160-220 Вт/м²К, то это позволяет обеспечить относительно низкие массогабаритные характеристики КТА.

Для снижения относительной влажности газов (до 20-25 %), покидающих КВП и КТА, предусматривается увеличение их температуры до 58-60 °С путем смешения с горячим воздухом, избыточно нагреваемым в КВП. Это мероприятие позволяет исключить конденсацию остаточных водяных паров в газоотводящем тракте, снижая, однако, при этом КПД системы.

В качестве примера, подтверждающего целесообразность применения данного варианта глубокой утилизации теплоты уходящих газов, разработана теплоутилизационная система на базе парового котла Е-1,0-0,9, работающего на природном газе. Котел вырабатывает насыщенный пар в количестве 0,278 кг/с, который используется для технологических нужд. В соответствии с тепловым расчетом котла расход газообразного топлива равен $23,38 \cdot 10^{-3}$ м³/с, температура уходящих газов составляет 200 °С и в связи с этим КПД котла равен 88,73 %, т.к. потеря теплоты с уходящими газами высока, $q_2 = 8,77\%$. С целью снижения потери q_2 предлагается снизить температуру уходящих газов до 35 °С, используя в качестве охлаждающих сред воздух и воду с температурой 10 °С.

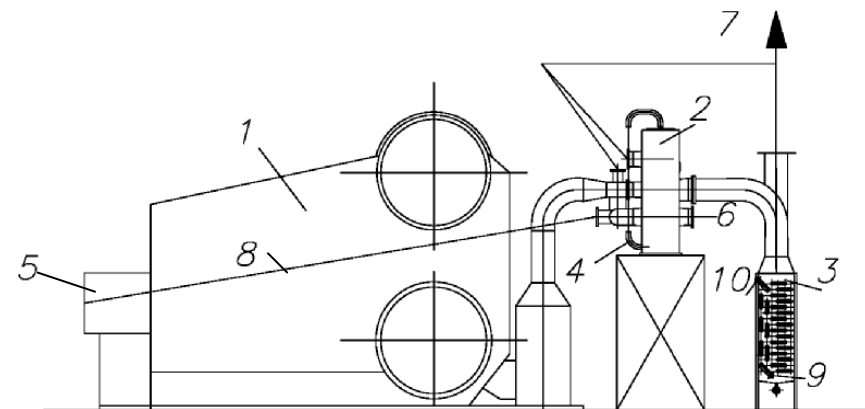
Выполненный с помощью программы на ЭВМ тепловой расчет системы «котел-КВП-КТА» подтверждает высокую эффективность идеи глубокой утилизации теплоты уходящих газов: КПД системы с учетом потерь теплоты с конденсатом и горячим воздухом, подаваемым в газоотводящий тракт, составляет 102,34 % (расчет осуществлен по низшей теплоте сгорания топлива), т.е. повышается на 13,6 %. Это дает возможность получить достаточно большую экономию топлива. Однако,

учитывая тот факт, что при уменьшении расхода топлива возникает негативное обратное влияние теплоутилизаторов на эффективность котла (за счет снижения объема продуктов сгорания уменьшается скорость их движения и, соответственно, коэффициент теплоотдачи), было принято решение оставить расход топлива неизменным, но при этом увеличить паропроизводительность котла до 0,322 кг/с. При этом в КВП нагревается воздух от 10 °С до 179,3 °С в количестве, необходимом для организации процесса горения топлива и подачи в газоотводящий тракт, и в КТА – вода в количестве 0,4839 кг/с от 10 °С до 42,4 °С. Чтобы использовать воду в системе горячего водоснабжения необходимо увеличить ее температуру до 65 °С. Для этого отбирается часть пара из котла в количестве 0,018 кг/с (5,6 %) и смешивается в нагретой в КТА водой. Поэтому паропроизводительность котла уменьшается до 0,304 кг/с, что, тем не менее, на 9,35 % больше ее исходного значения.

Конструктивно КВП выполнен таким же, как и КВП, предложенный в [6]. Однако, после «сухой» зоны газовый поток не разделяется на два, а подается в конденсационную зону в полном объеме и затем после охлаждения в КВП до температуры, лежащей немного ниже точки росы, поступает в КТА. Вместо элеваторной системы транспорта шарообразного теплоносителя применен пневмотранспорт. Это дает возможность несколько упростить конструкцию КВП, а также нагревать воздух с более высокой начальной температурой (20-30 °С). Площадь поверхности теплообмена КВП составляет 37,78 м². Аэродинамическое сопротивление шарообразного слоя в газовой части 95 кг/м², в воздушной – 30 кг/м².

Конденсационный теплообменный аппарат для нагрева воды представляет собой теплообменник змеевикового типа, составленный из пучков труб с ленточным оребрением и шахматным расположением. Наружный диаметр трубы 0,030 м, толщина стенки 0,0025 м, наружный диаметр ребер 0,051 м, толщина ребра 0,001 м, шаг расположения ребер 0,0056 м. Для защиты поверхностей теплообмена от коррозии предусмотрено антикоррозионное покрытие. Обеспечение минимальных массогабаритных характеристик КТА возможно лишь при относительно высоких коэффициентах теплопередачи, для достижения которых были приняты: скорость движения газов, равная 9 м/с и скорость движения воды, равная 0,7 м/с. Поскольку основная доля теплоты выделяется в КТА за счет конденсации водяных паров из парогазовой смеси при невысоких температурном уровне и температурном напоре, то живые сечения для прохода газов и воды при заданных скоростях их движения невелики при относительно большой площади теплообменной поверхности (17,4 м²). Поэтому конструктивно КТА выполнен шестисекционным по газам и двухходовым по воде.

Компоновочная схема системы «котел – теплоутилизаторы» приведена на рис. 1, из которой следует, что КВП и КТА имеют небольшие размеры и могут быть достаточно легко смонтированы в котельном цехе.



- 1 – котел;
- 2 – воздухоподогреватель;
- 3 – конденсационный теплообменный аппарат;
- 4 – пневмотранспорт шарообразного теплоносителя;
- 5 – горелка;
- 6 – холодный воздух;
- 7 – отвод продуктов сгорания и части горячего воздуха в дымовую трубу;
- 8 – горячий воздух в горелку;
- 9 – холодная вода;
- 10 – горячая вода.

Рис.1 Компоновочная схема системы «Котел – теплоутилизаторы»

Список литературы: 1. Сезоненко Б.Д., Нікітін В.Ю., Сезоненко О.Б. та інші. Децентралізоване виробництво теплової енергії та розробка енергоефективних водонагрівачів для його реалізації. - Екотехнології и ресурсосбереження, №3, 1999. С. 30-36. 2. Марченко Г.С. Котлы средней мощности для автономных систем теплоснабжения. - Екотехнології и ресурсосбереження, №3, 1999. С. 112-116. 3. Ковылянский Я.А. Развитие теплофикации в России. – Теплоэнергетика, №12, 2000. С. 7-10. 4. Новгородский Е.Е., Мишнер Й., Диттбернер Е. и др. Экономическая и экологическая оценка применения автономных систем энергосбережения.. - Энергосбережение и водоподготовка, №3, 2002. С. 89. 5. Капишиников А.П. Обобщенные теплообменные характеристики конденсационного экономайзера. – Промышленная теплоэнергетика, №3, 1994. С.32-34. 6. Ефимов А.В., Гончаренко Л.В., Цымбал К.Э. и др. Экспериментальная установка для глубокой утилизации теплоты газов, уходящих из водогрейного котла ТПВ-200. // Вісник національного технічного університету "ХПІ", №11, 2004. С. 63-68. 7. Басин Г.Л. Конденсационные отопительные котлы. – Водоснабжение и сантехника, №10, 1987. С. 25-27.

Поступила в редколлегию 25.04.05.